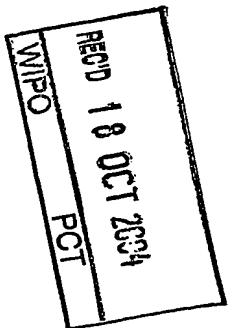


BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung
einer Patentanmeldung**

Aktenzeichen: 103 46 481.6
Anmeldetag: 02. Oktober 2003
Anmelder/Inhaber: DaimlerChrysler AG,
70567 Stuttgart/DE
Bezeichnung: Dreidimensionale Rekonstruktion von
Oberflächenprofilen
IPC: G 01 B 11/24

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 23. September 2004
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
 Im Auftrag

Wallner

**PRIORITY
DOCUMENT**
 SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
 COMPLIANCE WITH RULE 17.1 (a) OR (b)

DaimlerChrysler AG

dietrich
02.10.2003

Dreidimensionale Rekonstruktion von Oberflächenprofilen

Die Erfindung betrifft Verfahren zur Erfassung und Rekonstruktion von Strukturen auf Oberflächen, wie z.B. Erhebungen, Grate oder Senken.

5

Es sind verschiedene Verfahren bekannt, mit denen Profile von Oberflächen erfasst werden können. Zwei verschiedene Prinzipien können dabei unterschieden werden: Zum einen Verfahren, bei denen die zu charakterisierende Oberfläche direkt, z.B. mechanisch, abgetastet wird, zum anderen berührungslose Techniken.

10

Mechanische Abtastinstrumente, sogenannte „Profilometer“, führen eine Abtastnadel rasterförmig über die Oberfläche der Probe und detektieren dabei die sich durch das Oberflächenprofil vertikal ändernde Position der Nadelspitze. Sie werden häufig dort eingesetzt, wo die zu untersuchenden Objekte und der darauf zu erfassende Oberflächenbereich nicht sehr groß sind, da einerseits eine exakte Positionierung des Probenstücks unter dem Abtaster erforderlich ist, zum anderen die zeilenweise Abtastung größerer Felder mit einem entsprechenden zeitlichen Aufwand verbunden ist.

15

20

25

30

Berührungslose Abtastverfahren nutzen beispielsweise die Reflexion von Ultraschall (Prinzip des Echolots) oder basieren auf optischen (z.B. Laser-Scan) bzw. radartechnischen Verfahren. Je nach Einsatzgebiet ist dabei das eine oder andere Verfahren vorteilhafter. Ultraschallverfahren sind nicht in

allen Umgebungen und für sehr große Distanzen zwischen Objekt und Sensor geeignet. Für sehr große Objekte (z.B. Erdoberfläche) liefert z.B. die Radar-Altimetrie exakte Höhenangaben, bedingt aber einen technisch aufwendigen Sensor und erfordert 5 genaue Sensorpositionsbestimmungen. Optische Verfahren, insbesondere Laser-basierte, erfordern im Allgemeinen einen relativ hohen Kalibrieraufwand. Ein spezielles optisches Verfahren ist die Stereometrie, bei dem die zu untersuchende Oberfläche aus leicht unterschiedlichem Blickwinkel aufgenommen wird und aus der Auswertung der leichten stereoskopischen 10 Abweichungen die Strukturen der Oberfläche errechnet werden.

Die vorliegende Erfindung geht aus von den bekannten optischen Verfahren zur Erfassung und Rekonstruktion von Oberflächenstrukturen. Ihr liegt die Aufgabe zugrunde, ein neues 15 Verfahren zu entwickeln, dass sich durch einen breiten Anwendungsbereich auszeichnet. Diese Aufgabe wird gelöst durch das Verfahren nach Anspruch 1. Weitere Details und Vorteile der Erfindung sind Gegenstand der Unteransprüche.

20 Das erfindungsgemäße Verfahren wird im Folgenden näher erläutert und Anwendungsbeispiele dargestellt. Dabei wird Bezug genommen auf die Figuren und den darin angegebenen Bezugszeichen. Es zeigen:

25 Fig. 1 Aufnahme eines Teils der Mondoberfläche

Fig. 2 Detail-Ausschnitt aus Figur 1 bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen 2.1 und 2.2

30 Fig. 3 Extraktion der Schattenfelder aus Fig. 2.1 und 2.2

Fig. 4 Hervorhebung der Umrisslinien der Schattenfelder in Figur 2.1 und 2.2

Fig. 5 Zusätzliche Hervorhebung des Verlaufs von Graten und Umrisslinien um Flanken der Erhebungen

5 Fig. 6 Profil-Rekonstruktion der untersuchten Region

Fig. 7 Aufnahmen eines ca. 0,5 cm hohen Grates auf einer Metallfläche; Lichteinfall von links und rechts

10 Fig. 8 Errechnetes Höhenprofil des Grates aus Fig. 7

Fig. 9 Perspektivische Darstellung des rekonstruierten Grates

15 Fig.10 Aufnahmen einer Werkstückoberfläche mit kleinem Defekt; Lichteinfall von links und rechts

Fig.11 Errechnetes Höhenprofil der Strukturen auf der Werkstückoberfläche der Figur 10

20 Fig.12 Bildüberlagerung farbselektiver Aufnahmen einer Oberflächenstruktur

Fig.13 Prägung auf einem Metallwerkstück; Aufnahmen bei unterschiedlichem Lichteinfall

Fig.14 Ausschnitt aus Fig. 13 mit Lichteinfallrichtungen (Pfeile) und rekonstruierten Aufnahmen

30 Fig.15 Rekonstruktion der Prägung nach dem erfindungsgemäßen Verfahren mit integriertem Shape from Shading

Das erfindungsgemäße Verfahren wertet verschiedene Bilder desselben Bereichs der zu untersuchenden Oberfläche aus, wo-

bei die Bilder aus nahezu vertikaler Perspektive bei stark unterschiedlichem Lichteinfall aus verschiedenen Seiten aufgenommen werden. Die Erfindung macht sich dabei die Tatsache zunutze, dass insbesondere bei streifendem Lichteinfall, d.h. 5 mit einem Winkel zur Oberfläche von etwa 10° und darunter, Erhebungen oder Vertiefungen auf der Oberfläche einen deutlichen Schattenwurf zeigen. Die Formen der Schlagschatten sind dabei offensichtlich direkt abhängig von der Ausprägung des beleuchteten Profils, d.h. Ausdehnung, Höhen und Tiefen der 10 Strukturen auf der Oberfläche korrelieren mit unterschiedlichen Konturen der Schlagschatten. Neben der Analyse der Schattenkonturen berücksichtigt das erfindungsgemäße Verfahren auch die unterschiedliche Lichtreflexion von geneigten Bereichen der Oberfläche, beispielsweise zur Ermittlung des 15 Verlaufs einer Gratflanke.

Im einfachsten Fall nimmt man nur zwei Bilder unter Streiflicht auf, bei denen das Licht von verschiedenen (z.B. gegenüberliegenden) Seiten unter flachem Winkel auf die Strukturen scheint. Vorzugsweise - jedoch nicht zwingend - bleibt die Kameraposition relativ zur Oberfläche dabei unverändert, da sich in diesem Fall die Auswertung vereinfacht (identische Pixel-Koordinaten für identische Strukturen auf der Oberfläche). Verändert sich die Kameraposition, so können die Positionenverlagerungen durch entsprechende Korrekturen in der 20 Auswertung berücksichtigt werden.

Die so gewonnenen Bilder werden für die weitere Auswertung in einem ersten Schritt so zur Deckung gebracht, dass korrespondierende Bildpunkte (Pixel) übereinander liegen (abgebildete 25 Strukturen überdecken einander). In nächsten Schritt werden aus Grauwerten korrespondierender Pixel durch Quotientenbildung neue Bildpunkte errechnet. Aus zwei Ausgangsbildern mit Helligkeitswerten I_1 bzw. I_2 entstehen so zwei „Quotienten-

bilder" mit Pixelwerten I_1/I_2 bzw. I_2/I_1 . Durch die Quotientenbildung werden Bereiche mit geringer Albedo (auf ansonsten glatten Bereichen der Oberfläche), die bei Betrachtung nur eines Ausgangsbildes wegen des Helligkeitsunterschieds irrtümlich als Schatten gewertet werden könnten, annulliert, da

5 beide Ausgangsbilder (gleicher Einstrahlwinkel der Lichtquelle vorausgesetzt) für diese Bereiche die gleichen Helligkeitswerte aufweisen, was sich damit bei Quotientenbildung aufhebt. Die Quotientenbilder enthalten dann - stark kontrastiert - die Schlagschattenbereiche separiert nach Lichteinfall, d.h. jedes Quotientenbild I_1/I_2 bzw. I_2/I_1 liefert die Areale der Schlagschatten, die jeweils bei Beleuchtung nur von einer Seite auftreten.

15 Im nächsten Schritt werden die Konturen der Schlagschatten-Areale extrahiert. Dies erfolgt beispielsweise durch eine „binary connected component“ (BCC)-Analyse der Quotientenbilder (vergl. E. Mandler, M. Oberländer: One Pass Encoding of Connected Components in Multi-Valued Images, *IEEE Int. Conf. on Pattern Recognition*, pp64-69, Atlantic City, 1990). Die so erhaltenen Konturen können noch durch Glättungsverfahren, z.B. B-Spline-Interpolation (vergl. D.F. Rogers: *An Introduction to NURBS - With Historical Perspective*, Academic Press, San Diego, 2001) verfeinert werden, um die Genauigkeit der Profil-Rekonstruktion über die reine Auflösung der Bilder (Bildpunkt-Raster) hinaus weiter zu erhöhen. Alternativ können die beispielsweise mit dem BCC-Algorithmus ermittelten Konturen als Initialisierung für eine Segmentierung der Schattenumrisse auf den Ausgangsbildern mit Active-Contours verwendet werden (vergl. D.J. Williams, M. Shah: A Fast Algorithm for Active Contours and Curvature Estimation, *Computer Vision, Graphics Image Processing*, 55, pp. 14-26, 1992).

Sind die Konturen der Schlagschatten für jeden Lichteinfall separat bestimmt, so können im nächsten Schritt der Verlauf eines Grates einer Erhebung aber auch Stufen auf der Oberfläche bestimmt werden. Hierzu wird davon ausgegangen, dass z.B.

5 bei seitlichem Lichteinfall unter flachem Winkel von rechts der nach links fallende Schlagschatten einer Erhebung in der Aufnahme eine Schattenumriss bildet, dessen rechter Rand durch den Grat der Erhebung selbst gebildet wird. Entsprechendes gilt analog für die zweite Aufnahme (Beleuchtung von 10 links). Ein Vergleich korrespondierender Randbereiche von Schattenkonturen beider Aufnahmen liefert für einen Grat gleiche Konturabschnitte in beiden Bildern (rechter Rand einer Schattenkontur in Bild A entspricht linkem Rand der korrespondierenden Kontur in Bild B. Eine Stufe auf der Oberfläche liefert demgegenüber nur auf einer der Aufnahmen eine 15 Schattenkontur.

Zu jedem Punkt eines auf diese Weise ermittelten Grates (oder einer Stufe) lässt sich die zugehörige Schattenlänge (Ausdehnung des Schlagschattens parallel zur Einstrahlrichtung der Lichtquelle) direkt aus den extrahierten Schattenkonturen entnehmen. Bei bekanntem Einstrahlwinkel ergibt sich daraus die Höhe des Gratpunktes (bzw. Kante bei einer Stufe) und damit der Höhenverlauf des Grates (bzw. der Stufe).

25

Im letzten Schritt werden die Neigungsverläufe auf der Oberfläche bestimmt. Die zur Lichtquelle hin geneigten Oberflächengebiete sind in den Aufnahmen deutlich heller als die ebenen Oberflächengebiete. Diese Regionen können aus den Aufnahmen beispielsweise wieder mittels BCC-Algorithmus extrahiert werden. Dazu wird als Auswahlkriterium zunächst für jedes der Ausgangsbilder ein jeweiliger Helligkeitswert θ_1 bzw. θ_2 als Schwellwert festgelegt und damit nur die Regionen selektiert, deren Bildpunkte heller als der vorgegebene

Schwellwert θ_1 bzw. θ_2 ist. Zusätzlich wird berücksichtigt, welche der so selektierten Bereiche jeweils nur in einem der beiden Ausgangsbilder beleuchtet sind und im anderen nicht, d.h. für die in den jeweiligen Quotientenbildern gilt

5 $I_1/I_2 > \theta_0$ (bzw. $I_2/I_1 > \theta_0$), wobei θ_0 ein vorgegebener Schwellwert für die Quotientenbilder ist. Die auf diese Weise als Neigungsflächen identifizierten Bereiche können wieder mittels BCC-Algorithmus und/oder Active-Contour Verfahren als Konturverläufe extrahiert werden. In Verbindung mit dem ermittelten Höhenverlauf (Grat) lässt sich der Neigungswinkel 10 abschätzen (z.B. einer Gratflanke) und damit letztlich das Profil der Erhebung rekonstruieren.

Der Verlauf von Flanken ist hierbei nur relativ grob angenähert bestimmbar (lineare Steigung). Veränderungen des Neigungsverlaufs oder auch flache Strukturen (niedrige Senken, leichte Anhebungen mit geringer Neigung) lassen sich jedoch durch Shape-from-Shading Methoden bestimmen (vergl. X. Jiang, H. Bunke, Dreidimensionales Computersehen, Springer Verlag, Berlin 1997). Dabei werden leichte Veränderungen der reflektierten Lichtintensität ausgewertet, um bei bekannter geometrischer Anordnung zwischen Kamera, Objekt und Lichtquelle auf die jeweilige Neigung der reflektierenden Bereiche zu schließen. Kombiniert man das erfindungsgemäße Verfahren mit der 20 Shape-from-Shading Methode, so sind Oberflächenprofile mit hoher Qualität rekonstruierbar. Ein Beispiel hierfür ist in Fig. 13 - 15 wiedergegeben (Erläuterung unter Anwendungsbeispiel 3).

In besonders vorteilhafter Weise wird zunächst das Oberflächenprofil der zu rekonstruierenden Fläche bei geeigneter Initialisierung mittels der Shape-from-Shading Methode ermittelt. Anschließend wird dann in besonders gewinnbringender Weise der Winkel zwischen jedem Flächenelement und der für 30 das Schattenbild gültigen Lichteinfallsrichtung mit einem

konstanten Faktor so multipliziert, dass der mittlere Höhenunterschied auf dem rekonstruierten Profil dem zuvor gemäß der oben erläuterten Schattenanalyse ermittelten mittleren Höhenunterschied entspricht. Mit diesem Profil als Initialisierung wird mittels der Shape-from-Shading Methode ein neues Oberflächenprofil berechnet. Dieser Vorgang wird iterativ so lange wiederholt, bis die mittlere Veränderung des Höhenprofils zwischen zwei aufeinanderfolgenden Iterationsschritten kleiner als ein vorgegebener Schwellwert ist.

10

Bei den aus dem Stand der Technik bekannten Shape-from-Shading Methoden wird das Oberflächenprofil vielfach durch die iterative Minimierung einer Fehlerfunktion, welche die Abweichung zwischen realem und dem aus dem Oberflächenprofil rekonstruierten Bild, sowie weitere an die Oberfläche zu stellende Randbedingungen, wie zum Beispiel Glattheit Oberfläche und Integrabilität der Oberflächengradienten, berücksichtigt. In besonderer Weise kann diese iterative Minimierung dahingehend verbessert werden, dass bei der im Rahmen der Iteration bei der Shape-from-Shading Methode zu optimierenden Fehlerfunktion ein additiver Term hinzugefügt wird. Hierbei beschreibt dieser additive Term die Abweichung des aus dem im vorigen Iterationsschritt rekonstruierten Höhenprofil ermittelten Höhenunterschiedes in Lichteinfallsrichtung von dem mittels der Schattenanalyse bestimmten entsprechenden Höhenunterschied. Zur Initialisierung dieser vorteilhaften iterativen Minimierung kann in besonderer Weise das mittels der im vorigen Absatz beschriebenen Methode erhaltene Ergebnis genutzt werden.

30

Im beschriebenen einfachsten Fall einer Auswertung von nur zwei Aufnahmen (z.B. Links/Rechts-Beleuchtung) können Strukturen nicht ausreichend erfasst werden, die aufgrund ihrer Lage oder Form (hier z.B.: Verlauf einer Erhebung von links

nach rechts) in beiden Aufnahmen praktisch identische Abbildungen liefern. Diese Strukturen lassen sich jedoch einfach durch Wiederholung des Verfahrens bei Beleuchtung von anderen Seiten (hier z.B.: Oben/Unten-Beleuchtung) in entsprechender 5 Weise identifizieren, so dass letztlich alle Profilanteile durch wiederholte Anwendung des Verfahrens bei unterschiedliche Einstrahlrichtung rekonstruiert werden können.

Das erfindungsgemäße Verfahren zeichnet sich durch einen sehr 10 breiten Anwendungsbereich aus. Sowohl Oberflächen astronomischer Objekte in großer Entfernung können untersucht werden, als auch übliche Produkte in der industriellen Fertigung, bis hin zu kleinen Strukturen unter dem Mikroskop. Drei Anwendungsbeispiele zur Oberflächenprofilerfassung und Rekonstruktion 15 sollen dies verdeutlichen:

Anwendungsbeispiel 1

Rekonstruktion von Strukturen auf der Mondoberfläche

20 In Figur 1 ist ein Teil der Mondoberfläche wiedergegeben, wie er mit einem üblichen Teleskop aufgenommen werden kann (hier: 125mm Spiegelteleskop, 2600mm Brennweite, CCD-Kamera). In der dargestellten Region sind die Formationen „Hesiodus und „Wolf“ erkennbar (mit *H* bzw. *W* gekennzeichnet). Ein Detailausschnitt etwa zwischen diesen Formationen ist hervorgehoben 25 und vergrößert in Figur 2.1 und 2.2 wiedergegeben. Dabei zeigt Teilbild 2.1 diesen Bereich bei Lichteinfall von links und Teilbild 2.2 den Bereich bei Lichteinfall von rechts, wo- 30 bei die Sonneneinstrahlung jeweils unter einem flachen Winkel von ca. 4° zur Mondoberfläche einfällt. Deutlich sind die seitlichen Schattenfelder der Erhebungen zu erkennen. Figur 3 zeigt die kontrastverstärkte Extraktion der Schattenfelder durch rechnerische Bildung des Quotienten I_1/I_2 (bzw. I_2/I_1)

aus den Helligkeitswerten korrespondierender Bildpunkte aus beiden Bildern. Die daraus mittels BCC-Analyse bestimmten Konturen sind als Umrisslinien in das jeweilige Teilbild der Figur 4 eingetragen. Figur 5 zeigt zusätzlich die ermittelten 5 Umrisslinien der Grat- bzw. Kraterflanken (Linien um helle Bereiche), sowie die aus den Konturen abgeleiteten Lagen der Scheitelpunkte der Grade bzw. des Kraterrands.

Figur 6 zeigt eine perspektivische Darstellung des rekonstruierten Profils der analysierten Mondregion. 10

Anwendungsbeispiel 2

Rekonstruktion von Strukturen auf Werkstücken

15 Im Bereich der industriellen Qualitätskontrolle kann das erfundungsgemäße Verfahren beispielsweise zur Oberflächenprüfung von Rohbauteilen eingesetzt werden. Dabei können verschiedene Strukturen untersucht werden: Grade, Schweißnähte, 20 konvexe und konkave Wölbungen, Lunker und Einschlüsse usw. Dies wird derzeit oftmals noch durch manuelles „Tasten“ oder mittels Photogrammetrie bei hohem Kalibrieraufwand im Messlabor bewerkstelligt. Durch das neue Verfahren erübrigt sich der Kalibrieraufwand. Zudem kann bei geeigneter Kamerabrennweite auch mit verhältnismäßig großem Abstand vom Objekt vermesssen werden. Das von der Kamera aufgenommene Bild kann dabei zusätzlich mit gespeicherten, z.B. aus CAD-Daten erzeugten Bildinformationen („Drahtmodell“) verglichen werden und so auch geringfügige Abweichungen vom Soll-Profil detektiert 25 30 -werden.

In den beiden Teilbildern der Figur 7 ist ein Grat auf einer ansonsten ebenen Werkstückoberfläche wiedergegeben, wobei die Beleuchtung zum einen von links, zum anderen von rechts unter

flachem Winkel zur Oberfläche einfällt. Figur 8 zeigt das aus diesen Aufnahmen mit dem erfindungsgemäßen Verfahren bestimmte Höhenprofil des Grates, der eine Höhe von bis zu etwa 5 mm aufweist. Zwei perspektivische Ansichten des rekonstruierten 5 Grades sind in Figur 9 wiedergegeben.

Auch deutlich kleinere Strukturen lassen sich so bestimmen: Figur 10 zeigt in zwei Teilbildern (streifende Beleuchtung von verschiedenen Seiten) den Oberflächenausschnitt eines 10 weiteren untersuchten Werkstücks (Metallplatte) mit relativ kleinen Defekten (zwei parallel verlaufende Grade). Die Grade selbst sind bei senkrechter Kameraposition fast nicht erkennbar, deutlich sind aber die durch seitliche Beleuchtung erzeugten Schatten der Grade (punktierte Linien). Nach Auswertung 15 dieser Bilder mit dem erfindungsgemäßen Verfahren lässt sich das Profil der Grade wie in Figur 11 dargestellt rekonstruieren. Die Höhe der Grade beträgt in diesem Beispiel etwa 1,5 bzw. 0,6 mm).

20 Anwendungsbeispiel 3

Rekonstruktion einer Prägung mit integriertem „Shape-from-Shading“

25 Figur 13 zeigt ein Werkstück aus Metall mit einer Prägung (Ausschnitte) bei Beleuchtung von unterschiedlichen Seiten. In Figur 14 sind die Ausschnitte wiedergegeben, die Pfeile geben die Einstrahlrichtung an, die rechten Teilbilder sind die nach dem erfindungsgemäßen Verfahren erhaltenen Rekonstruktionen. Figur 15 ist die perspektivische Darstellung des Ergebnisses mit integriertem Shape-from-Shading, so dass die 30 rekonstruierten Verläufe von Flanken und Mulden gut mit dem Original übereinstimmen. Die Prägungstiefe beträgt in diesem Beispiel etwa 0,4 mm.

Das erfindungsgemäße Verfahren kann in verschiedener Weise umgesetzt werden. Beispielsweise kann die Beleuchtung des zu untersuchenden Objekts durch eine einzige Lichtquelle erfolgen, die für die verschiedenen Beleuchtungswinkel um die entsprechende Drehachse (Lot von Kamera zum Objekt) geschwenkt wird. Mit gleichem Ergebnis kann die Lichtquelle ortsfest angeordnet sein und das Objekt rotiert (gleiche Drehachse).

10

Bei mehreren Lichtquellen können Schwenk- oder Rotationsmechanismen entfallen. Dabei werden die Bilder dann zeitlich nacheinander mit jeweils einer eingeschalteten Lichtquelle aufgenommen. Bei Verwendung von Lichtquellen unterschiedlicher Wellenlängen (z.B. rot und grün) können die Bilder auch simultan aufgenommen werden und durch Farbfilter die jeweiligen Belichtungsteilbilder separiert werden. Als Beispiel zeigt Figur 12 eine Überlagerung solcher Farbfilteraufnahmen.

20

Der Begriff „Licht“ ist dabei nicht auf das sichtbare Spektrum begrenzt, d.h. auch IR oder UV Lichtquellen können mit entsprechender Kameraausstattung eingesetzt werden.

25

Zur Bildaufnahme sind alle Kameras mit entsprechender Auflösung geeignet. Grundsätzlich gilt dabei: höhere Auflösung bewirkt höhere Rekonstruktionsgenauigkeit. Heutige CCD-Kameras bieten hohe Auflösungen und liefern digitale Bilder, die direkt zur Auswertung mittels EDV zur Verfügung stehen. Damit lässt sich bereits aus handelsüblichen Komponenten (Kamera, Laptop, Stativ, Lichtquelle) eine transportable Messeinrichtung zur Durchführung des Verfahrens zusammenstellen.

DaimlerChrysler AG

dietrich

02.10.2003

Patentansprüche

1. Verfahren zur optischen Erfassung und Rekonstruktion von
5 Oberflächenprofilen,
dadurch gekennzeichnet,
dass die zu untersuchende Oberfläche aus verschiedenen
Richtungen unter flachem Einstrahlwinkel beleuchtet wird
und dabei Aufnahmen der Oberfläche aus einer Kameraposition
10 mit steilem Winkel zu Oberfläche angefertigt werden
und durch Extraktion der Konturen von Schlagschatten auf
den Aufnahmen aus Lichteinfallwinkel und Kameraposition
Höhenprofile von Strukturen ermittelt werden.
- 15 2. Verfahren nach Anspruch 1
dadurch gekennzeichnet,
dass die Kamera nahezu lotrecht zur Oberfläche angeordnet
wird.
- 20 3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2,
dadurch gekennzeichnet,
dass der Lichteinfallwinkel kleiner 10° zur Oberfläche
beträgt.
- 25 4. Verfahren nach Anspruch 1, 2 oder 3,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Schlagschatten auf den Aufnahmen durch Bildung
der Quotienten aus Helligkeitswerten korrespondierender

Bildpunkte extrahiert werden.

5. Verfahren nach Anspruch 4,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Konturen der Schlagschatten mittels „Binary-
Connected-Component“-Methode bestimmt werden.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5,
dadurch gekennzeichnet,
dass auch Konturen heller Lichtreflektion auf den Aufnah-
men selektiert und zur Rekonstruktion von stark ge-
neigten Bereichen der Oberfläche, beispielsweise einer
Gratflanke, auswertet werden.

- 15 7. Verfahren nach Anspruch 6,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Konturen heller Lichtreflektion dadurch festge-
legt werden, dass die reflektierte Lichtintensität einen
vorgegebenen Schwellwert übersteigt.

- 20 8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7,
dadurch gekennzeichnet,
dass zusätzlich Helligkeitsverläufe nach der Shape-from-
Shading Methode ausgewertet und zur Rekonstruktion der O-
berflächenstrukturen herangezogen werden.

- 25 9. Verfahren nach Anspruch 8,
dadurch gekennzeichnet,
dass bei der Rekonstruktion der Oberflächenstrukturen zu-
nächst das Oberflächenprofil der zu rekonstruierenden
Fläche bei geeigneter Initialisierung mittels der Shape-
from-Shading Methode ermittelt wird,
dass anschließend der Winkel zwischen jedem Flächenele-
ment- und der für das Schattenbild gültigen Lichteinfalls-

richtung mit einem konstanten Faktor so multipliziert wird, dass der mittlere Höhenunterschied auf dem rekonstruierten Profil dem zuvor gemäß der oben erläuterten Schattenanalyse ermittelten mittleren Höhenunterschied

5 entspricht,

dass im nächsten Schritt als Initialisierung mittels der Shape-from-Shading Methode ein neues Oberflächenprofil berechnet wird,

10 und dass dieser Vorgang iterativ solange wiederholt wird, bis die mittlere Veränderung des Höhenprofils zwischen zwei aufeinanderfolgenden Iterationsschritten kleiner als ein vorgegebener Schwellwert ist.

10. Verfahren nach Anspruch 8,

15 dadurch gekennzeichnet,

dass bei einer iterativen Minimierung im Rahmen der Shape-from-Shading Methode diese dahingehend verbessert wird,

20 dass bei der zu optimierenden Fehlerfunktion ein zusätzlicher Fehlerterm addiert wird, wobei dieser additive Term die Abweichung des aus dem im vorigen Iterations- schritt rekonstruierten Höhenprofil ermittelten Höhenunterschiedes in Lichteinfallsrichtung von dem mittels der Schattenanalyse bestimmten entsprechenden Höhenunter- schied beschreibt.

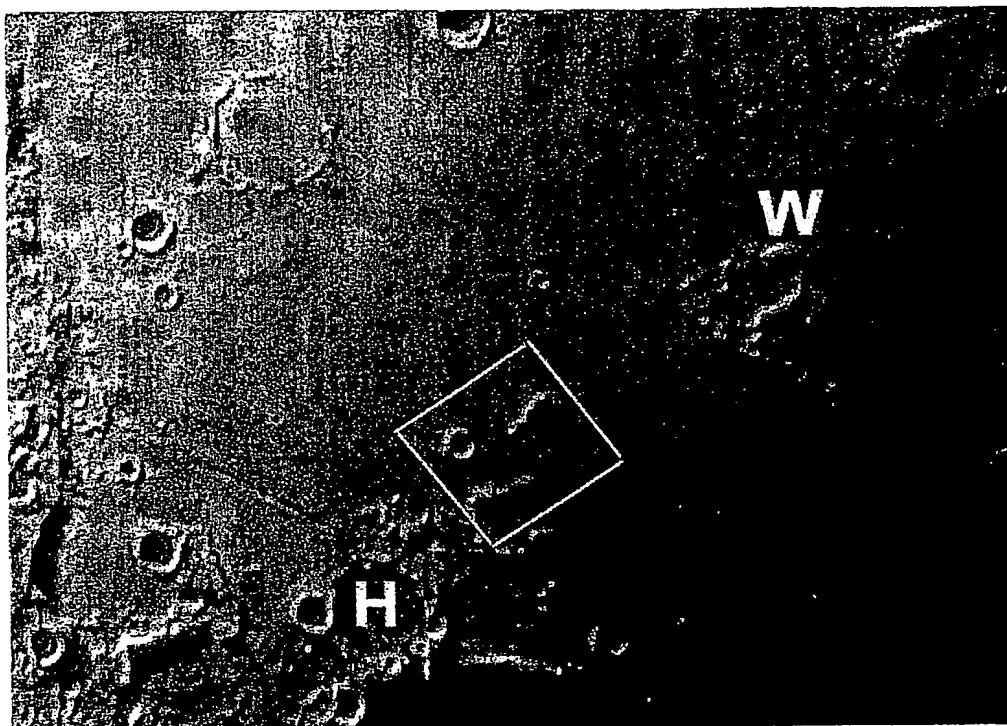
25 11. Verfahren nach Anspruch 10,

dadurch gekennzeichnet,

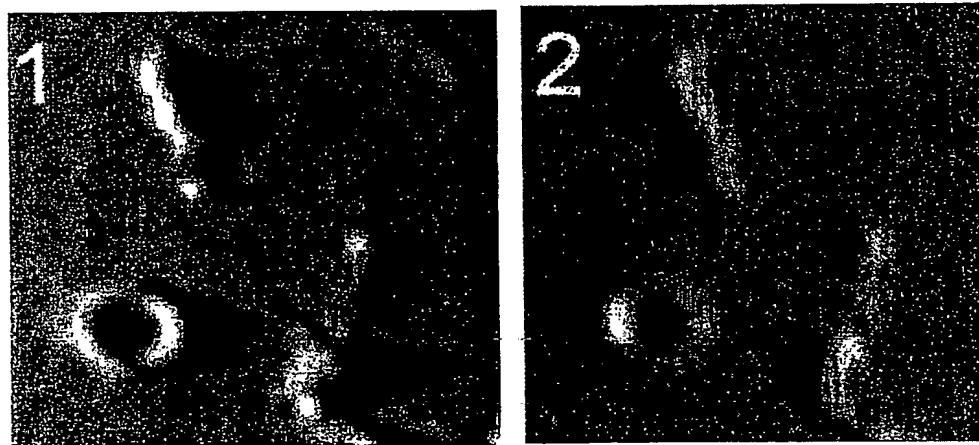
30 dass zur Initialisierung der iterativen Minimierung das Ergebnis des Verfahrens nach Anspruch 9 verwendet wird.

12. Verwendung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 11, zur Rekonstruktion von planetaren Oberflächen.

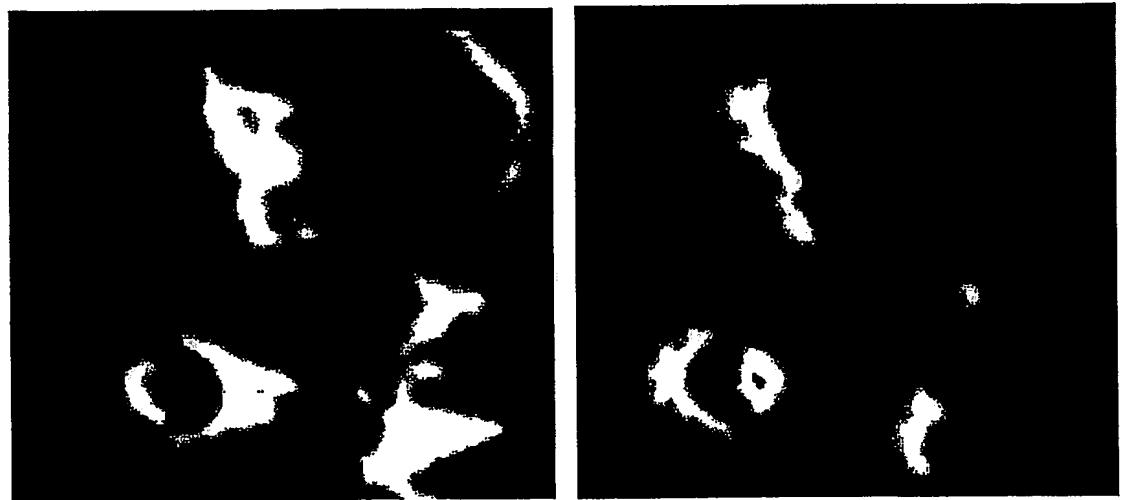
13. Verwendung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 11, zur Inspektion der Oberfläche industrieller Bauteile.



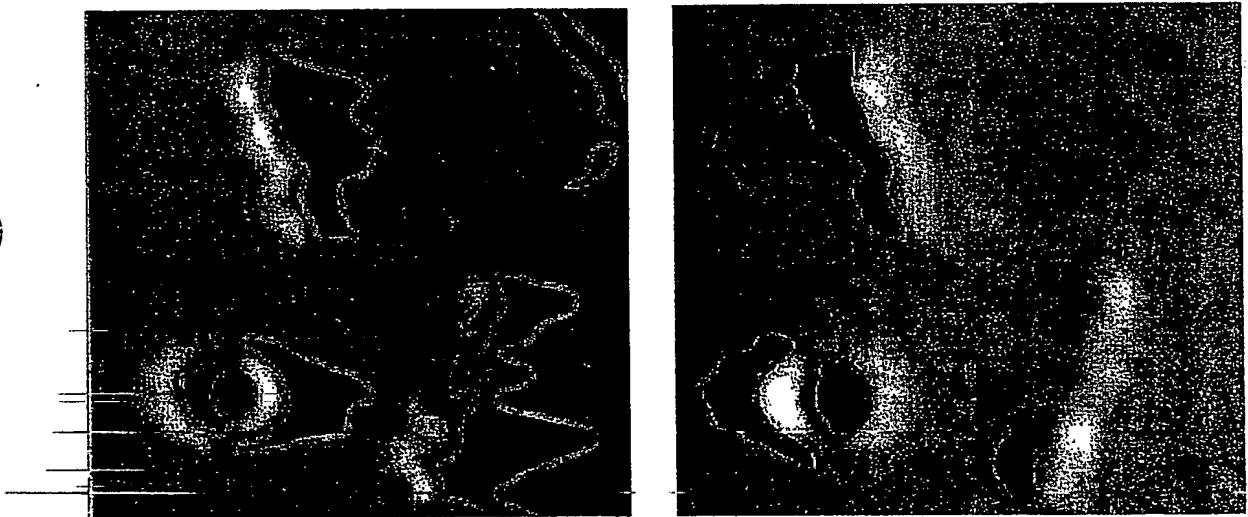
Figur 1



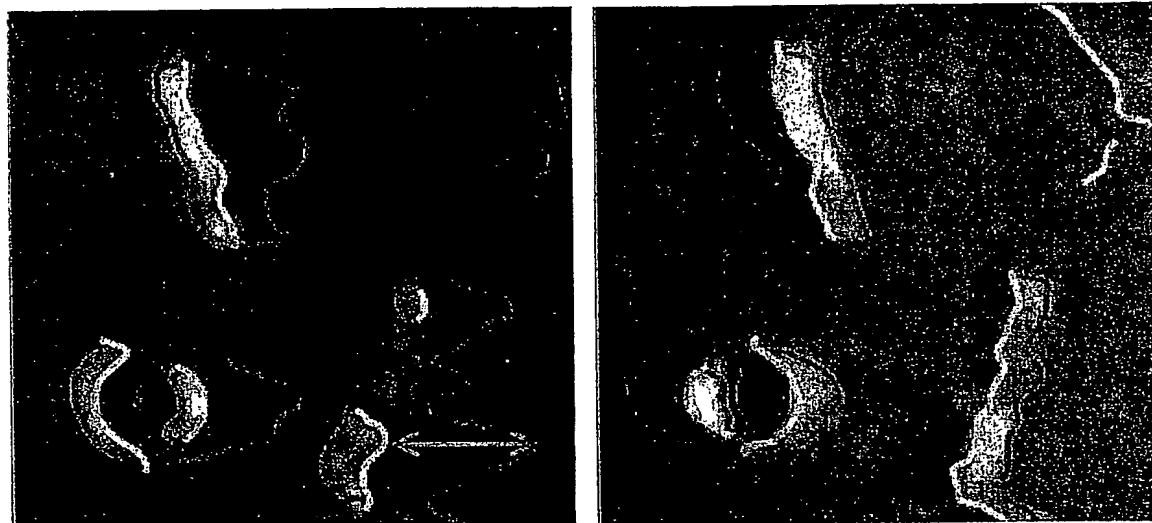
Figur 2



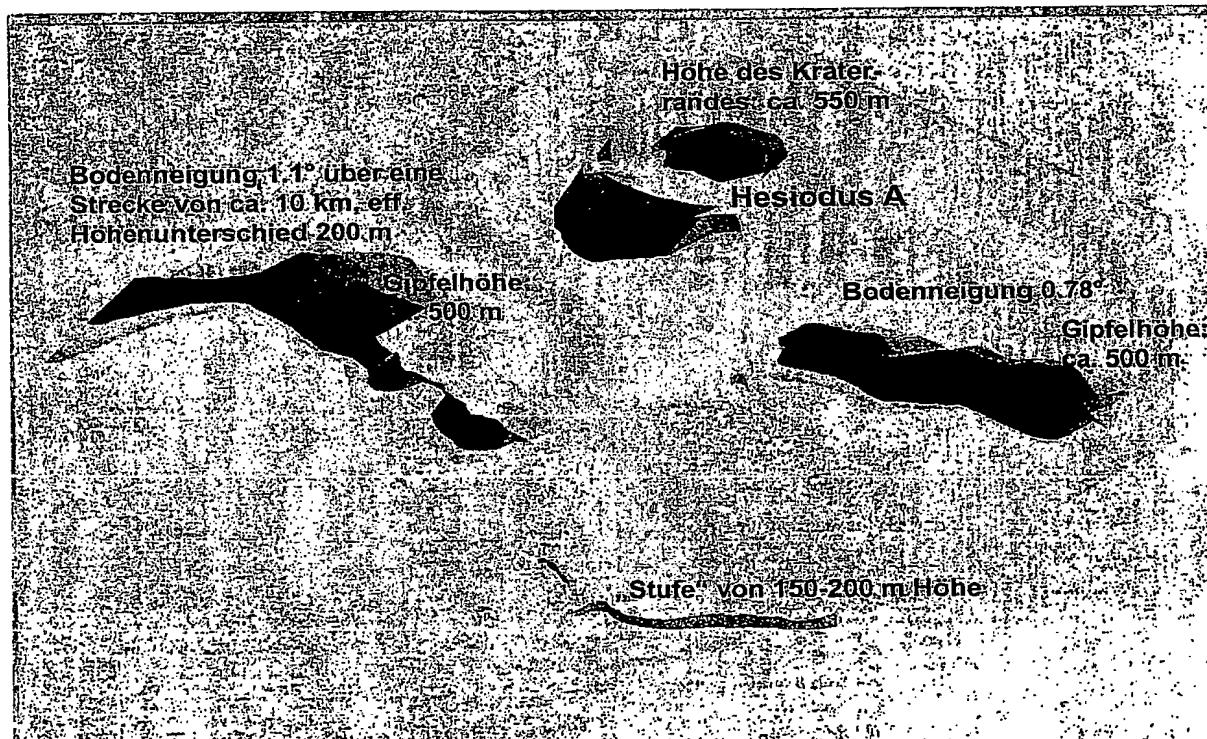
Figur 3



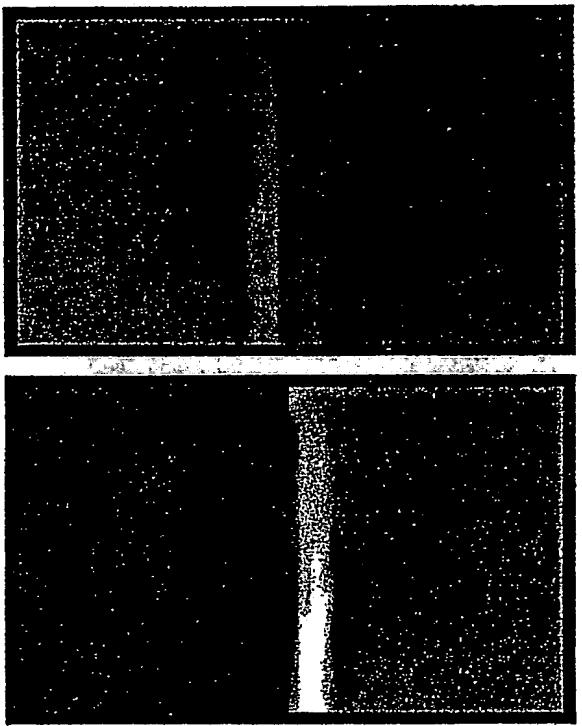
Figur 4



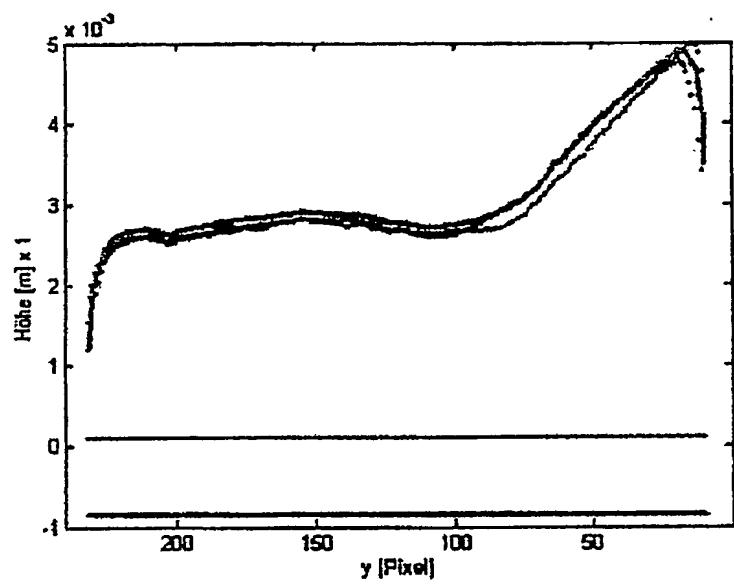
Figur 5



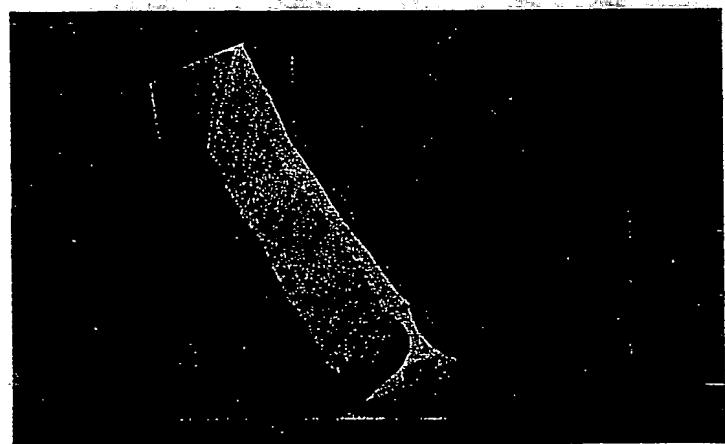
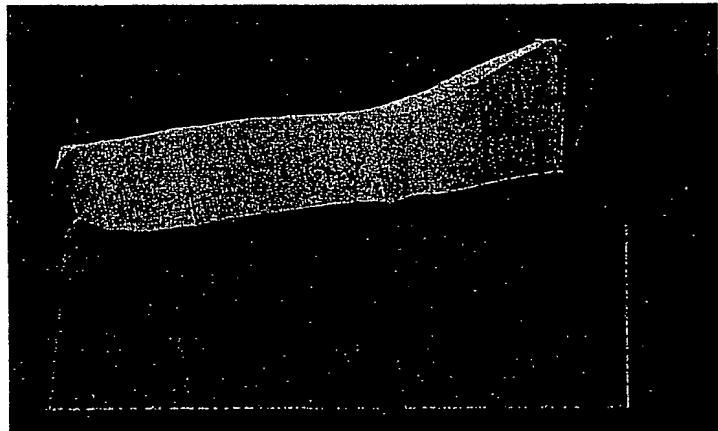
Figur 6



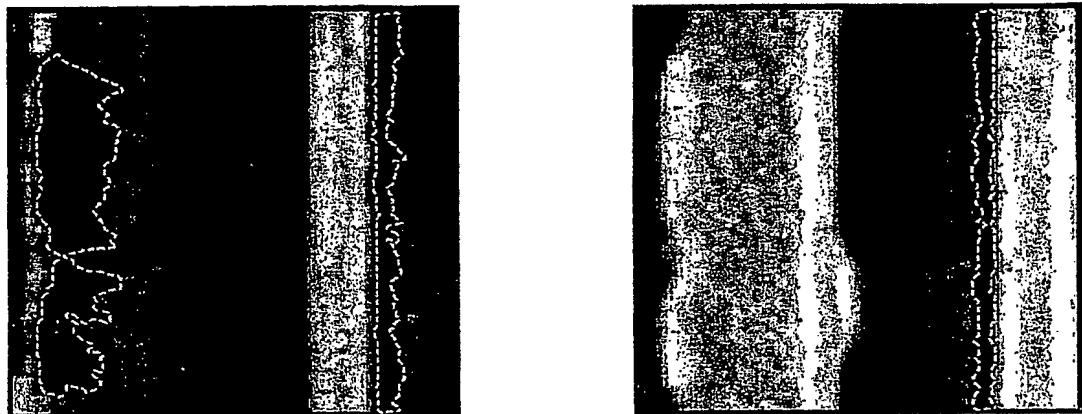
Figur 7



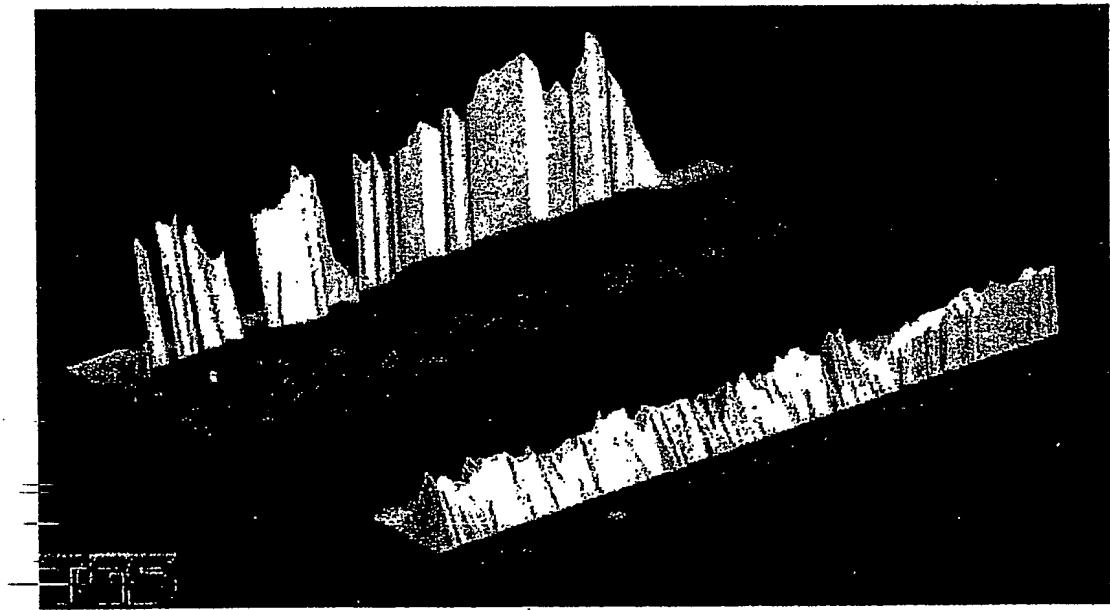
Figur 8



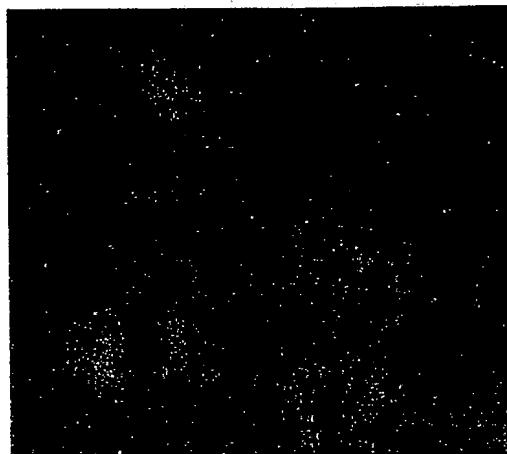
Figur 9



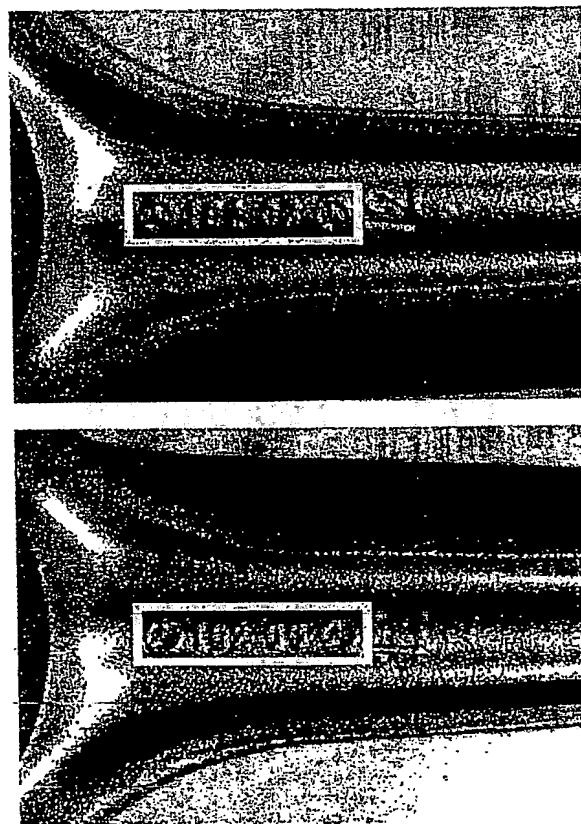
Figur 10



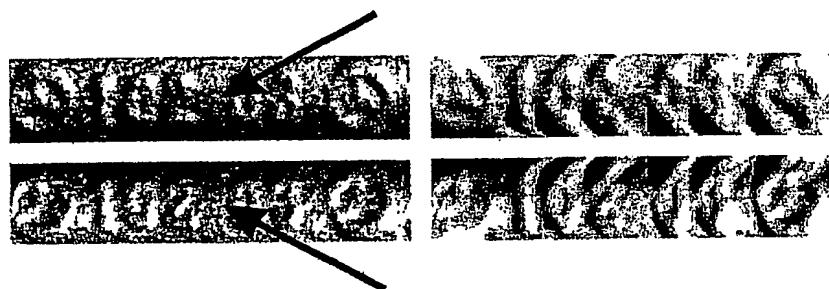
Figur 11



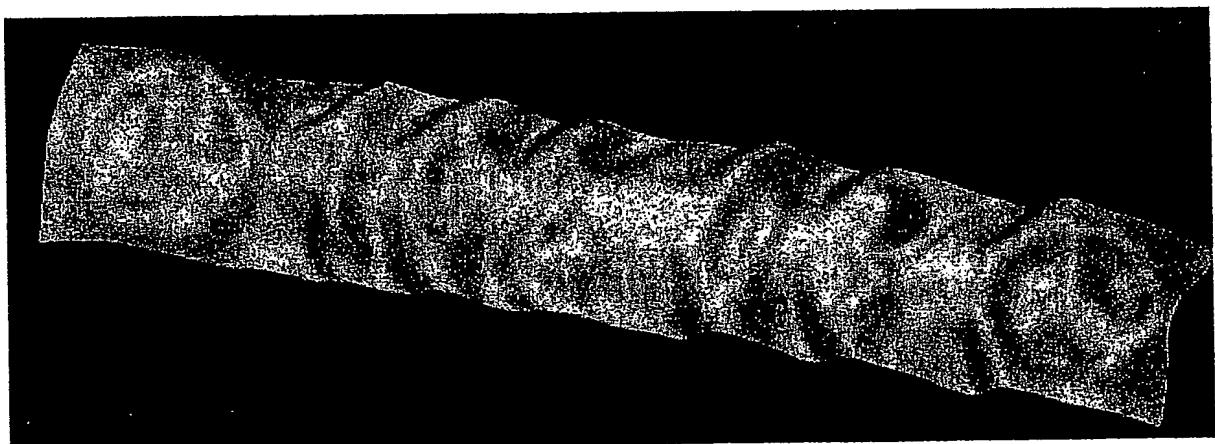
Figur 12



Figur 13



Figur 14



Figur 15

DaimlerChrysler AG

dietrich

02.10.2003

Zusammenfassung

5 Vorgeschlagen wird ein Verfahren zur Rekonstruktion des Pro-
fils von Strukturen auf Oberflächen. Dazu werden mindestens
zwei Bilder desselben Bereichs der zu untersuchenden Oberflä-
che ausgewertet, wobei die Bilder z.B. aus nahezu vertikaler
Perspektive aufgenommen werden und die Beleuchtung aus ver-
10 schiedenen Richtungen unter flachem Winkel zur Oberfläche er-
folgt. Erhebungen oder Vertiefungen auf der Oberfläche zeigen
so auf den Aufnahmen einen deutlichen Schattenwurf dessen La-
ge mit der Lichteinstrahlung variiert. Geneigte Flächen sind
durch hellere Reflektion identifizierbar. Durch Analyse von
15 Schattenkonturen und Umrisslinien heller Bereiche lässt sich
das Höhenprofil einer Struktur auf der Oberfläche bestimmen
und so beispielsweise der Verlauf eines Grates rekonstruie-
ren. Durch Integration der Shape-from-Shading-Methode können
auch flache Neigungsänderungen durch Auswertung von Hellig-
20 keitsverläufen bestimmt werden und somit eine gut mit dem
Original übereinstimmende 3D-Rekonstruktion der Oberfläche
erreicht werden.